



## Une étude sur les spécificités de la commande dans le micromonde.

Yassine Haddab, Yann Le Gorrec

### ► To cite this version:

Yassine Haddab, Yann Le Gorrec. Une étude sur les spécificités de la commande dans le micromonde.. Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA), 2010, 44 (6), pp.577-601. 10.3166/jesa.44.577-601 . hal-00587112

**HAL Id: hal-00587112**

**<https://hal.science/hal-00587112>**

Submitted on 19 Apr 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Une étude sur les spécificités de la commande dans le micromonde

**Yassine Haddab — Yann Le Gorrec**

*Institut FEMTO-ST (Franche-Comté Electronique, Mécanique, Thermique et Optique – Sciences et Technologies), département AS2M (Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques), CNRS UMR 6174, Université de Franche-Comté, UTBM, ENSMM.*

*24 rue Alain Savary*

*F-25000 Besançon*

*{yassine.haddab, legorrec}@femto-st.fr*

---

*RÉSUMÉ. Le développement des micro et nano-technologies, domaines stratégiques majeurs, passe par la réalisation et l'utilisation de systèmes capables d'exécuter des tâches de manipulation sur des objets de taille submillimétrique. De nombreux travaux de recherche ont été menés pour la conception et la fabrication de microsystèmes et de microrobots pouvant agir dans le micromonde. Cependant, l'accroissement des performances de ces microsystèmes et microrobots et leur fiabilisation passe nécessairement par la mise en œuvre de lois de commande raffinées tenant compte des nombreuses spécificités de ces systèmes miniaturisés. Dans cet article, nous présentons une étude sur les principales caractéristiques du micromonde relatives à la commande ainsi que quelques pistes de réflexion pour la synthèse de lois de commande adaptées.*

*ABSTRACT. The development of micro and nanotechnologies requires the design of microrobots and Microsystems able to handle submillimetric objects. Many micromanipulation systems have been built. However, improvement of the performances requires the use of advanced control methods. In this paper, we present the main characteristics of the microworld from a control point of view and some control strategies adapted to the microsystems.*

*MOTS-CLÉS: caractéristiques du micromonde, commande des microsystèmes, effet d'échelle.*

*KEYWORDS: characteristics of the microworld, control of Microsystems, scale effect.*

---

## 1. Introduction

Les micro et nano-technologies représentent aujourd'hui des enjeux stratégiques et économiques majeurs. Leur développement passe par la réalisation et l'utilisation de systèmes capables d'exécuter des tâches de manipulation sur des objets très petits. Dans de nombreuses disciplines, les recherches et développements actuels sont étroitement liés à la miniaturisation. L'exploration de l'infiniment petit a ouvert des possibilités nouvelles. Dans le domaine biomédical, l'étude des génomes et la manipulation génétique présentent des perspectives thérapeutiques intéressantes. De même, la manipulation de très petits organes tels que des petits vaisseaux sanguins permet des interventions jusqu'ici irréalisables. Dans les secteurs de l'économie moderne, outre le fait que la miniaturisation soit un argument commercial évident, la réponse aux besoins sans cesse croissants nécessite la disponibilité de moyens de manipulation et d'assemblage toujours plus précis. Des secteurs à forte production tels que les disques durs d'ordinateurs, les téléphones mobiles ou les systèmes de télécommunications à fibres optiques sont quelques exemples pour lesquels la capacité à manipuler de très petits composants est directement liée à la performance des produits. Par ailleurs, la fabrication de MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) a atteint des degrés de maturité et de répétabilité importants permettant d'envisager une production de masse dans un avenir proche. Contrairement à la microélectronique, les composants MEMS ne peuvent généralement pas être manipulés par des systèmes de buses à dépression. En effet, dans un composant microélectronique, seule la fonction électrique ou électronique est utile. Ceci a conduit à la standardisation des formes de ces composants. En revanche, un composant MEMS peut avoir plusieurs fonctions : mécanique, optique, fluide etc. Ceci conduit à des formes tridimensionnelles complexes dont la manipulation nécessite une grande dextérité (voir Figure 1).

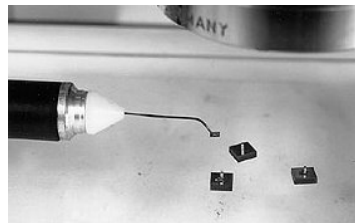
Les prévisions sur le marché mondial des MEMS prévoient un accroissement fort de la production. D'une valeur de 10 milliards de \$ en 2005, le marché devrait atteindre selon les prévisions 40 milliards de \$ en 2015 (Bryzek *et al.*, 2003).

La maîtrise de la manipulation précise de microcomposants est donc un enjeu important. De nombreux travaux de recherche ont été menés pour la conception et la fabrication de microsystèmes et de microrobots pouvant agir dans le micromonde (le monde des objets de taille micrométrique). Ces systèmes permettent déjà de répondre à certains besoins. Cependant, l'accroissement des performances de ces microsystèmes et microrobots et leur fiabilisation passe nécessairement par la mise en œuvre de lois de commande raffinées tenant compte des nombreuses spécificités de ces systèmes miniaturisés. A ces échelles dimensionnelles, les actionneurs et les structures utilisées dans les systèmes conventionnels ne sont plus utilisables car ils ne permettent pas d'atteindre des résolutions et des précisions suffisantes pour le micromonde. De nouveaux actionneurs et de nouvelles structures fondées essentiellement sur des éléments élastiques déformables sont alors utilisés. Leur comportement est souvent fortement non linéaire et parfois non stationnaire. De plus,

en raison de l'effet d'échelle (réduction des dimensions), les rapports signal/bruit sont très défavorables et l'intégration de capteurs sur le système est complexe.

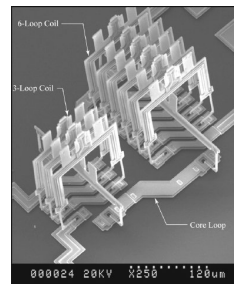
Dans la partie suivante, nous décrirons les caractéristiques principales et les spécificités du micromonde.

### Microélectronique



- composants plats,
- composants robustes,
- faciles à manipuler (buses à dépression),
- fonction électrique uniquement.

### Microsystèmes



- formes 3D complexes,
- composants fragiles,
- assemblages hybrides
- nécessite des préhenseurs adaptés,
- nécessite une grande dextérité,
- Fonctions mécanique, électrique, optique, pneumatique etc.

**Figure 1.** Différences entre la manipulation de composants microélectroniques et la manipulation de composants MEMS (Dechev et al., 2004).

## 2. Spécificités du micromonde

On désignera par « micromonde », le monde des objets de taille micrométrique. En pratique, cet intervalle dimensionnel concerne les objets dont la taille est comprise entre 1  $\mu\text{m}$  et 1 mm ainsi que les outils de manipulation dont les dimensions peuvent être supérieures mais dont les caractéristiques (courses, précision, etc.) sont compatibles avec cette échelle. La conception de systèmes pour le micromonde ainsi que la synthèse de lois de commande pose des problèmes spécifiques dus à l'effet d'échelle. Ces spécificités sont résumées ci-dessous.

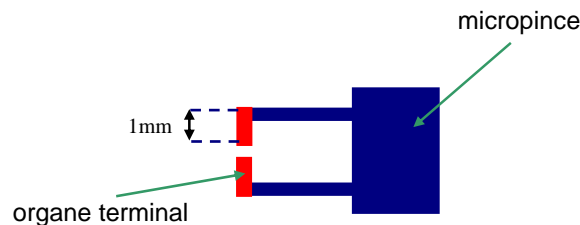
### 2.1. Difficulté d'accès direct à l'homme

L'incompatibilité des échelles dimensionnelles empêche l'accès direct de l'homme au micromonde. Que ce soit pour l'observation ou la manipulation, l'usage d'interfaces est nécessaire. Ces interfaces sont souvent très couteuses (microscopes,

caméras, organes haptiques, calculateurs, etc.). L'espace de perception est souvent localisé et la profondeur de champ très faible.

## 2.2. Influence et variabilité de l'environnement

Compte tenu des précisions visées, les conditions environnementales ont une influence importante sur le comportement des microsystèmes. Les variations de température, du taux d'humidité, les flux et rayonnements divers produisent à ces échelles des effets qui ne peuvent pas être négligés. A titre d'exemple, la Figure 2 représente une micropince dont l'organe terminal est une poutre en aluminium de 1 mm de long. Sous l'effet de la variation de la température, la dilatation thermique peut atteindre plusieurs micromètres, perturbant ainsi la fonction de serrage de cette pince.



**Figure 2.** Micropince avec organes terminaux en aluminium.

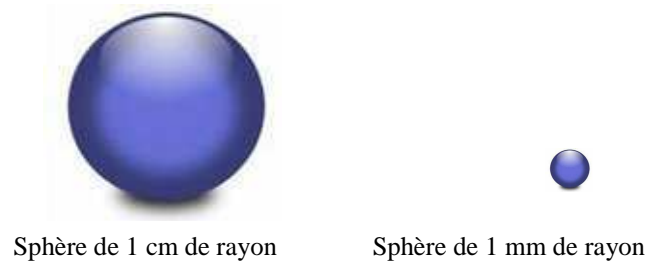
## 2.3. Complexité de la physique du micromonde

Bien que les lois de la physique soient applicables dans le micromonde, les rapports des amplitudes des forces sont différents. La dynamique à l'échelle humaine est principalement régie par les forces inertielles (forces volumiques). A l'inverse, dans le micromonde les effets surfaciques sont prépondérants par rapport aux forces volumiques. Cette situation pose des problèmes spécifiques notamment de lâcher ou de déposer des micro-objets manipulés. En effet, après l'ouverture d'une micropince, l'objet manipulé reste souvent collé à l'un des doigts de la pince. Les forces surfaciques (forces électrostatiques, forces de Van Der Waals, forces de capillarité), souvent négligeables à l'échelle macroscopique, provoquent l'adhésion des micro-objets (Régner *et al.*, 2008). Ce phénomène est illustré sur la Figure 3.

## 2.4. Actionneurs et systèmes nouveaux

La réalisation de microsystèmes ne peut être obtenue par réduction homothétique des dimensions des systèmes de manipulation traditionnels. En effet, les actionneurs traditionnels utilisés ne peuvent être facilement miniaturisés. De plus, les jeux dans les engrenages et les mécanismes empêchent l'obtention de précisions compatibles avec le micromonde. C'est pourquoi les principes d'actionnement largement utilisés

dans les systèmes traditionnels, tels que les effets électromagnétiques, sont généralement abandonnés au profit d'autres effets physiques mieux adaptés au micromonde et exploitant la déformation des matériaux. Les principaux actionneurs utilisés dans les microsystèmes sont :

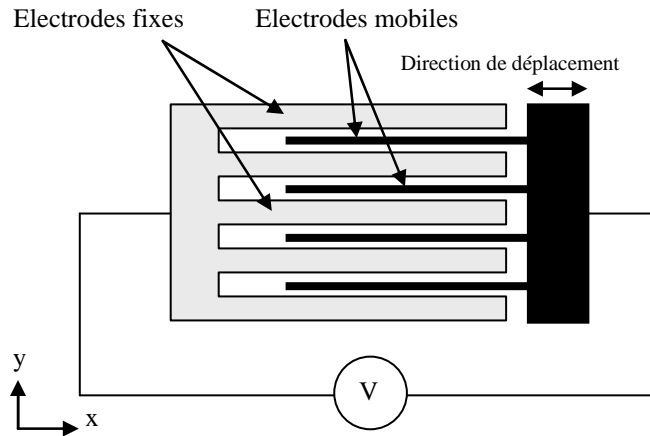


Pour un rapport de rayons de 10, le rapport des surfaces est de 100 tandis que le rapport des volumes est de 1000. La réduction des tailles favorise donc les forces surfaciques par rapport aux forces volumiques

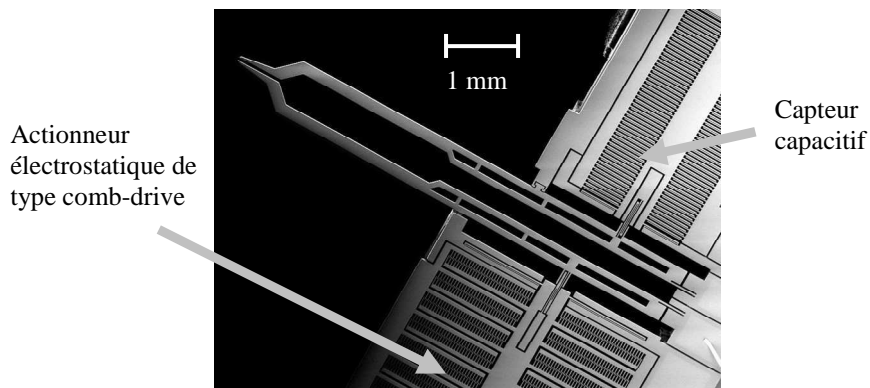
**Figure 3.** Effet de la réduction des dimensions sur les forces volumiques et surfaciques.

- les micro-actionneurs électrostatiques : probablement les plus utilisés dans les microsystèmes, ils sont réalisés par micro-usinage du silicium et dépôt de conducteurs (métaux) et d'isolants ( $\text{SiO}_2$ ) en couches minces. Il est ainsi possible de réaliser sur un wafer de silicium (galette en silicium usinée en salle blanche) des microsystèmes monolithiques complets incluant les actionneurs. Bien que plusieurs configurations soient possibles, ces actionneurs sont souvent construits sous la forme de comb-drives (ou peignes inter-digités) dont le principe est représenté sur la Figure 4. Cette forme permet d'augmenter l'amplitude de la force produite pour une même tension de commande. L'application d'une différence de potentiel électrique entre les armatures tend à rapprocher les deux parties de la structure. La force générée est proportionnelle au carré de la tension électrique appliquée. L'arrêt de l'excitation produit le retour de la partie mobile à sa position initiale sous l'effet de ressorts de rappel. La figure 5 présente une micropince réalisée et commercialisée par la société FEMTO-TOOLS (<http://www.femtotools.com>) actionnée à l'aide d'un comb-drive. L'effet électrostatique est également utilisé pour réaliser un capteur de force ou de déplacement. En effet, le déplacement d'une armature

produit une variation de capacité. Cette dernière peut alors être mesurée.



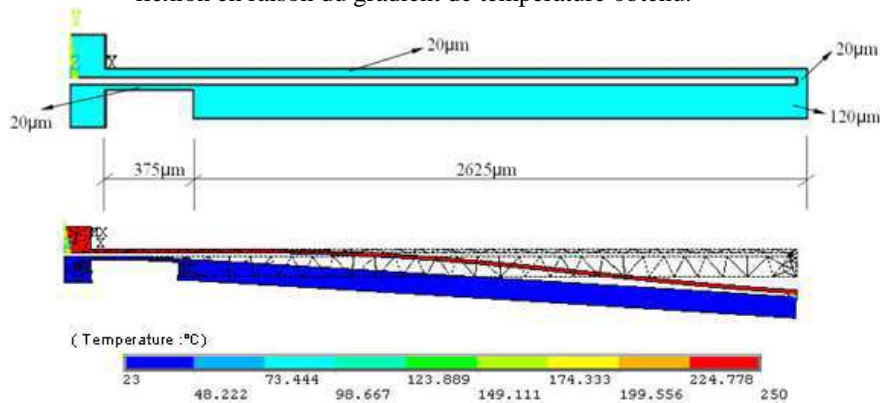
**Figure 4.** Structure de base d'un actionneur électrostatique de type comb-drive.



**Figure 5.** Micropince à actionnement électrostatique réalisée par la société FEMTO TOOLS. L'écartement au repos entre les doigts est de 30  $\mu\text{m}$  ou de 100  $\mu\text{m}$  selon le modèle.

- les micro-actionneurs à dilatation thermique : ces actionneurs sont fondés sur la dilatation thermique des matériaux. Ils peuvent produire des forces motrices importantes mais ont un temps de réponse long en raison des échanges thermiques. Ils peuvent être aisément fabriqués par micro-usinage. Leur principal inconvénient est leur sensibilité à la

température ambiante. La Figure 6 présente le principe de fonctionnement d'un micro-actionneur thermique exploitant la différence de section entre deux poutres réalisées dans le même matériau. Le passage d'un courant à travers la structure produit une flexion en raison du gradient de température obtenu.

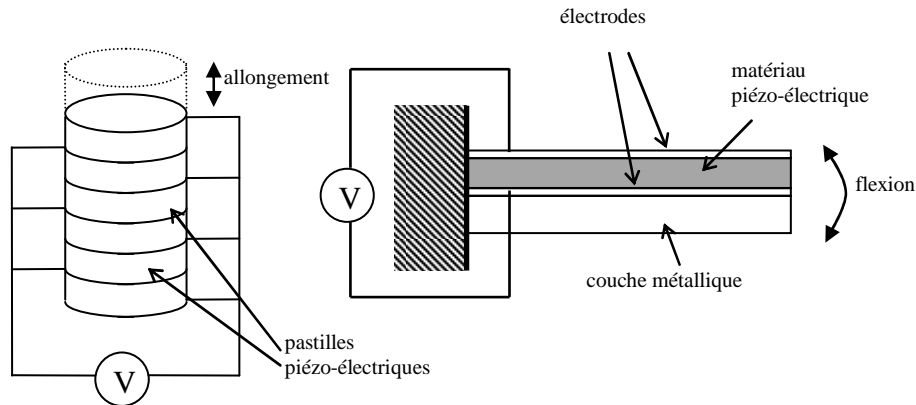


**Figure 6.** Exemple de dimensionnement d'un micro-actionneur thermique fondé sur la différence de géométrie.

- les micro-actionneurs en alliages à mémoire de forme (AMF) : ils produisent des déformations importantes grâce à un effet de transduction thermomécanique. L'origine de cette transduction est non pas la dilatation thermique, mais le changement de phase lié à la variation de température et à la contrainte appliquée. Ces actionneurs passent d'une phase solide à une autre phase solide (austénite / martensite). Souvent sous forme de fils ou de lames, leur comportement est complexe et très fortement hystérétique (Benzaoui, 1998).
- les micro-actionneurs piézoélectriques : l'effet piézoélectrique apparaît aussi bien dans des matériaux naturels (quartz, tourmaline sel de rochelle, etc.) que dans des matériaux de synthèse (PZT, LiNbO<sub>3</sub>, PVDF etc.). L'application d'un champ électrique provoque une déformation du matériau. Cet effet étant réversible, les matériaux piézoélectriques peuvent être utilisés aussi bien en actionneurs qu'en capteurs. Ces actionneurs sont caractérisés par des temps de réponse courts, c'est pourquoi ils sont très utilisés dans des applications nécessitant des mouvements rapides. Les déplacements obtenus étant très faibles (de l'ordre de 0,2%) des structures d'amplification mécanique sont alors utilisées (voir Figure 7). Sur cette figure, deux principes d'amplification sont illustrés : l'empilement permettant d'additionner les déplacements et l'effet bilame produisant une flexion.



Le comportement de ces micro-actionneurs fait apparaître des phénomènes d'hystérésis et de dérive lente (*creep*).



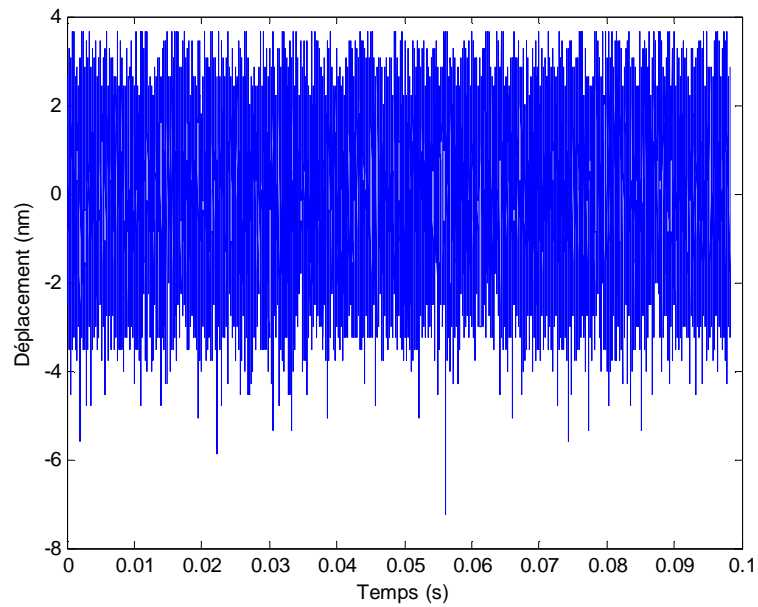
**Figure 7.** Microactionneurs piézoélectriques utilisant une amplification mécanique.

Outre l'emploi d'actionneurs différents, l'on trouve dans les microsystèmes des structures d'actionnement nouvelles. A titre d'exemple, nous pouvons citer les structures à actionneurs répartis (souvent appelées smart surfaces) constituées d'une matrice de micro-actionneurs servant par exemple à véhiculer des micro-objets sur une surface (Fukuta *et al.*, 2006) ou des structures à actionneurs répartis sur un treillis (Grossard, 2008). Ces structures posent des problèmes de commande spécifiques et complexes.

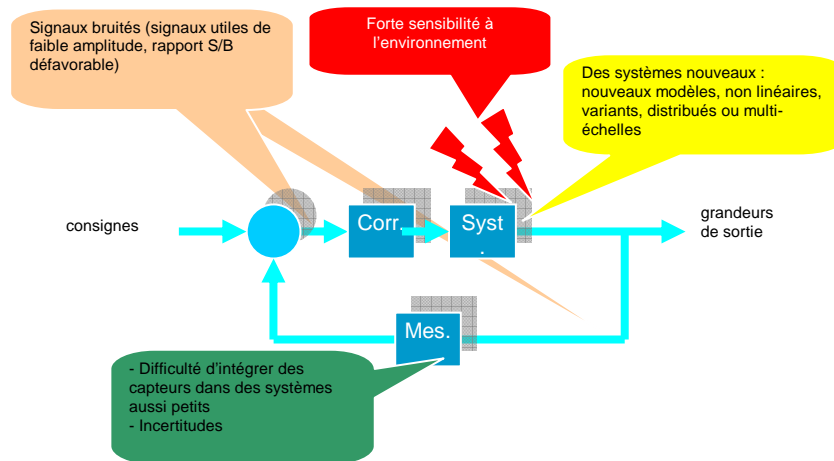
- Rapport signal/bruit défavorable : l'une des particularités des signaux dans le micromonde est la présence d'un niveau de bruit important. Les signaux utiles sont de très faible amplitude. Les déplacements sont souvent de l'ordre de 10 nm à 100  $\mu\text{m}$  et les forces mises en œuvre comprises entre 1 nN et 10 mN. Il en résulte un rapport signal/bruit très défavorable. A titre d'exemple, la Figure 8 présente le bruit mesuré à l'aide d'un interféromètre à l'extrémité d'un levier d'AFM (Atomic Force Microscope ou microscope à force atomique) de dimensions : 444 $\mu\text{m}$  x 50 $\mu\text{m}$  x 2,1 $\mu\text{m}$  au repos, fixé sur une table anti-vibration.

A ces échelles, il est nécessaire d'analyser les bruits et leurs origines pour en tenir compte dans la modélisation et la synthèse des lois de commande.

La Figure 9 résume les principales caractéristiques de la commande dans le micromonde.



**Figure 8.** Bruit mesuré à l'extrémité d'un levier d'AFM (Atomic Force Microscope) au repos.



**Figure 9.** Caractéristiques de la commande dans le micromonde.

### **3. La perception dans le micromonde**

Que ce soit pour la vérification du succès d'une tâche de micromanipulation ou de micro-assemblage, ou pour la mise en œuvre de lois de commande, la mesure des grandeurs de sortie (en particulier : déplacements et forces) est indispensable.

#### **3.1. Mesure de position**

Le problème de la mesure de position à haute résolution a été largement étudié à d'autres fins (analyse des surfaces, microtribologie etc.) et de nombreux procédés de mesure existent. Plusieurs méthodes peuvent être employées pour la mesure de déplacements de très faible amplitude. Le choix sera conditionné essentiellement par la résolution visée, les possibilités d'intégration, en particulier pour des applications nomades et le coût. Les systèmes à réflexion infrarouge permettent des résolutions de l'ordre de 1  $\mu\text{m}$  pour un coût très faible. Ils sont cependant non linéaires et très perturbés par la lumière ambiante. Les télémètres par triangulation optique utilisant une cellule PSD (Position Sensing Detector) sont insensibles à la lumière et offrent une résolution pouvant atteindre 10 nm. Des résolutions encore meilleures peuvent être obtenues par l'emploi de capteurs inductifs de type LVDT (Linear Variable Differential Transformer), remarquables par leur linéarité et leur aptitude à fonctionner dans des milieux hostiles (hautes ou basses températures, hautes pressions etc.)

#### **3.2. Mesure de micro-forces**

Dans le micromonde, la mesure des forces exercées sur les objets manipulés est essentielle pour la réussite d'une tâche de micromanipulation ou de micro-assemblage. En effet, à ces échelles dimensionnelles, les objets sont souvent fragiles et ils peuvent être endommagés ou détruits s'ils sont manipulés sans contrôle de la force de serrage. La réduction des dimensions des manipulateurs rend difficile l'intégration de capteurs. Cependant, diverses approches ont été employées pour mesurer les forces exercées sur les objets manipulés. De manière générale, ces forces sont évaluées à partir de la mesure de la déformation d'un corps d'épreuve (poutre, membrane, etc.) dont la raideur est connue. Cette déformation est mesurée à l'aide d'un capteur de position. En fonction de la résolution désirée, divers effets peuvent être mis en œuvre (Lu *et al.*, 2006). Pour des mesures inférieures à 0.1  $\mu\text{N}$ , les matériaux piézoélectriques, en particulier les PVDF (Polyvinylidene Fluoride) sont souvent employés. Ces matériaux donnent de hautes résolutions mais les mesures statiques sont complexes en raison de la décharge électrique. Fung *et al.* ont intégré un capteur PVDF sur des sondes commerciales pour la caractérisation des MUMPs® (Multi-user MEMS Processes) (Fung *et al.*, 2002). Les capteurs électrostatiques microfabriqués sont caractérisés par une bonne linéarité et permettent de mesurer des forces pouvant atteindre 25  $\mu\text{N}$  avec une résolution de 10 nN. Pour des résolutions encore meilleures, des principes de mesures optiques sont utilisés. Un levier d'AFM (Atomic Force Microscope) associé à un capteur laser permet des mesures de forces

dans les échelles nanométriques. Arai et al. ont détecté des forces de 3 pN en exploitant les caractéristiques mécaniques d'un nanotube de carbone calibré dont la déformation est mesurée par un FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscope) (Arai *et al.*, 2003). Les jauges d'extensométrie de petite taille sont également très souvent utilisées. Elles peuvent être collées sur des composants déformables. Les performances de la mesure dépendent fortement des caractéristiques mécaniques du composant déformable considéré. L'emploi de poutres déformables centimétriques permet des résolutions de l'ordre du mN tandis que les poutres microfabriquées permettent d'atteindre des mesures à l'échelle du  $\mu$ N. L'association de micro-jauges avec des techniques de filtrage optimal permet d'accroître sensiblement la résolution de la mesure (Haddab *et al.*, 2009).

En parallèle à ces différents capteurs, il est fréquent d'utiliser la vision comme outil de perception. Bien que les fréquences d'acquisition et les traitements d'images soient de plus en plus rapides et performants, ce type de capteur est difficilement utilisable « en ligne » dans une boucle de régulation. Il est en revanche tout à fait adapté pour la commande haut niveau (génération de trajectoires).

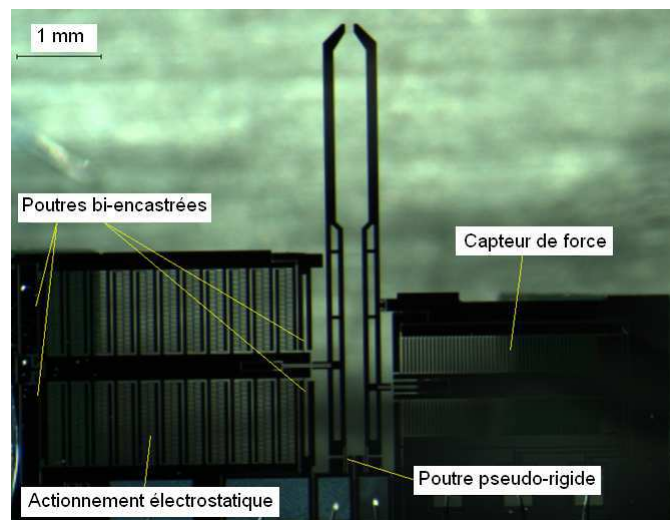
Enfin, il serait incomplet de ne pas mentionner ici la problématique des capteurs logiciels ou « observateurs ». En effet, le nombre de mesures étant restreint, il est naturel d'essayer d'utiliser la modélisation mathématique du système, et les signaux disponibles, afin de reconstruire théoriquement et numériquement les variables non mesurées. Ce type d'approche, dual au problème de commande, fait l'objet de nombreux développements théoriques (filtres de Kalman, Kalman étendu, Observateurs grand gain etc.). L'approche la plus utilisée dans le cadre des microsystèmes est le filtre de Kalman. Une application de l'observateur grand gain peut être trouvée dans (Zhang *et al.*, 2004).

#### 4. Commande des microsystèmes, un nouvel enjeu

Comme cela a été indiqué en introduction, la manipulation précise à l'échelle micrométrique présente un réel enjeu tant sur le plan théorique qu'applicatif. En effet, ces systèmes présentent toutes les difficultés auxquelles l'automatique doit faire face : complexité des phénomènes physiques mis en jeu, aspect multiphysique, et distribué spatialement, non linéarités, variation des paramètres, faible nombre de capteurs et d'actionneurs, perturbations exogènes importantes, etc. Dans ce qui suit, nous décrivons de manière non exhaustive les différentes approches habituellement utilisées pour la modélisation, l'estimation et la commande des MEMS. L'exemple de la micropince à actionnement électrostatique nous servira de fil conducteur pour illustrer une partie des notions abordées dans cette section.

*Exemple : Micropince à actionnement électrostatique.* Le système considéré est la micropince de type FEMTO-TOOLS FT-G100 à actionnement électrostatique (Figure 10). Cette dernière, en silicium, est composée de deux doigts assimilables à des poutres de faible section, d'un système d'actionnement et d'un système de

mesure de force. Un des doigts est actionné au tiers de sa hauteur (une extrémité est encastrée, l'autre est libre) par le biais d'un actionneur électrostatique formé de peignes interdigités, dits *comb-drive* (Cf. Section 2), générant une force électrostatique proportionnelle au carré de la tension appliquée. L'ensemble est fixé au bâti par le biais de poutres de rappel (poutres bi-encastrées). La mesure de force est effectuée sur l'autre doigt de la pince par le biais d'un second jeu de peignes interdigités et d'une mesure capacitive. L'espacement en bout de pince, pour le modèle considéré, est de 100 micromètres.



**Figure 10.** Architecture interne de la micropinse FT-G100.

L'objectif est de manipuler avec précision et sans dépassement l'extrémité de la pince en agissant sur la tension d'alimentation du *comb-drive*, de saisir des objets d'élasticités différentes et de les caractériser. La pince pourra être amenée à manipuler des objets biologiques en milieu liquide.

#### 4.1. Modélisation

##### 4.1.1. Modèles et complexité

La modélisation n'est qu'une représentation mathématique des phénomènes physiques mis en jeu. La complexité du modèle élaboré dépend de l'objectif recherché. Habituellement, et cela est d'autant plus vrai pour les microsystèmes, on distingue deux types de modèles : les modèles de simulation et les modèles de synthèse (ou commande). Les premiers sont destinés à valider l'approche mise en œuvre et la loi de commande synthétisée. Ils sont donc détaillés et prennent en compte un maximum de paramètres et de phénomènes mis en jeu. Les seconds, utilisés pour la synthèse à proprement parler, sont amenés à être utilisés dans des

algorithmes complexes ou pour des résolutions mathématiques fines. Leur degré de complexité doit être le plus faible possible (tout en représentant correctement l'évolution dynamique du système). Dans ce dernier cas, les variables spatialement distribuées sont souvent moyennées et de nombreux phénomènes sont négligés. En effet, il est bien connu que la plus élégante des théories est vouée à l'échec si elle est appliquée sur un modèle trop complexe. C'est le cas, par exemple, des techniques de linéarisation entrées-sorties utilisant les dérivées de Lie (Isidori, 1995, Khalil, 2002, Vidyasagar, 1993) ou les approches robustes polytopiques (Scherer *et al.*, 1997, Chilali *et al.*, 1999). Pour ces approches, les dimensions et la complexité des modèles utilisés sont de réels facteurs limitants. C'est là un des nombreux compromis dont le concepteur doit tenir compte lors de la synthèse de lois de commande.

#### 4.1.2. Spécificités de la modélisation des MEMS

La modélisation des MEMS repose sur l'écriture des équations fondamentales de la mécanique, de l'électricité, de l'électromagnétisme et de la thermodynamique, ces équations étant généralement couplées les unes aux autres. Bien que ces principes fondamentaux soient les mêmes que pour les systèmes macroscopiques, la réduction d'échelle ne permet plus certaines approximations. Il est donc nécessaire de considérer des phénomènes habituellement négligés tels que les variations de paramètres liés à la température, les interactions moléculaires, les forces de capillarité etc. De plus, l'utilisation de matériaux souples et complexes (hétérogènes) aboutit le plus souvent à des modèles à paramètres distribués, c'est à dire dont les variables d'état dépendent à la fois du temps et de l'espace. Le modèle résultant est alors régi par des Equations aux Dérivées Partielles (EDP). C'est le cas par exemple des micro pinces constituées de poutres en silicium régies par des équations d'ondes (Yamahata *et al.*, 2006), des actionneurs à base d'AMF dont l'allongement est fonction de l'alignement cristallographique associé à la température (Gauthier *et al.*, 2008), des actionneurs piézo-électriques actionnés électriquement (Rakotondrabe *et al.*, 2009), les actionneurs à base d'IPMC (Ionic Polymer Metal Composite) (G. Nishida *et al.*, 2008) mais aussi des systèmes de type matriciel ou *smart systems* (Fukuta *et al.*, 2006). Dans tous ces exemples, le principe de modélisation est le même qu'en dimension finie : on écrit les équations de bilan et les équations de fermeture, mais sur des densités (variables locales) plutôt que sur des variables globales. En ce qui concerne la simulation de ces systèmes, il est nécessaire de réduire la dimension et de se ramener à un problème de type EDO (Equation aux Dérivées Ordinaires). Pour cela on distingue deux types d'approches (Villadsen *et al.*, 1978) : les approches à base d'*approximations d'équations*, telles que les différences finies, et les approches à base d'*approximation de solutions* telles que les techniques de résidus pondérés (éléments finis, volume finis, méthode des moments, approximation de Galerkin). En ce qui concerne l'analyse et la commande des systèmes régis par des EDP, il faut soit travailler sur un modèle d'ordre réduit contenant les dynamiques prépondérantes du système, soit utiliser des résultats théoriques développés en dimension infinie (analyse spectrale, systèmes abstraits). Ces derniers sont nombreux dans le cas des systèmes linéaires. Il est donc fréquent

de travailler au voisinage d'un point de fonctionnement à partir du modèle complet, la réduction n'ayant lieu que pour la simulation du système et l'implantation de la loi de commande.

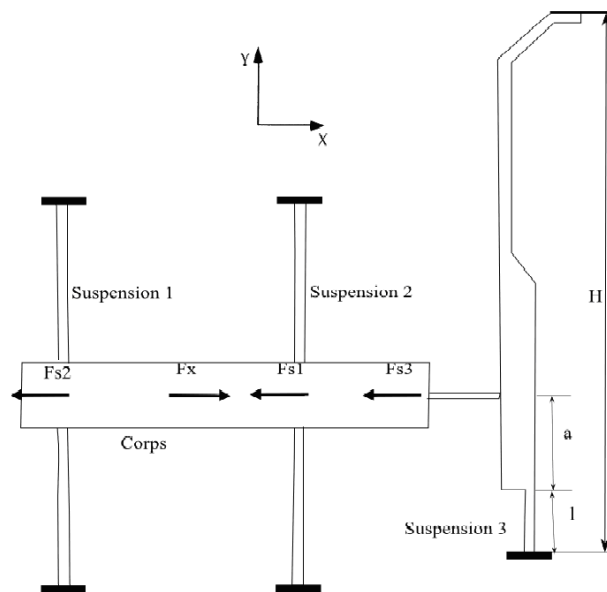
Enfin, une caractéristique importante des MEMS est leur aspect multiphysique et multiéchelles. Cette dimension est rarement prise en compte lors de la modélisation. Elle est cependant très importante car elle implique l'interconnexion de plusieurs sous systèmes complexes et peut aboutir à des résolutions numériques délicates. En effet, un choix non judicieux des variables d'état de chaque sous-système aboutit à des discontinuités lors de l'interconnexion. Ces discontinuités sont habituellement levées par le biais de modèles simples, linéaires, représentant le comportement de l'interface. Bien que continu, le modèle devient raide numériquement et peut devenir difficile à simuler, voire inexploitable. Une alternative élégante à cette modélisation est l'approche énergétique basée sur la formulation Hamiltonienne à ports et l'outil graphique *Graphe de Liaisons* ou *Bond Graph* (Karnopp *et al.*, 1990). Le principe consiste à manipuler des couples de variables conjuguées de puissance, c'est à dire les variables intensives et extensives de la thermodynamique. On peut citer par exemple les couples Pression/Volume, Tension/ Charge, Vitesse/Quantité de mouvement, Distance/Force etc. Lors de l'interconnexion de deux sous systèmes, on exprime mathématiquement la continuité du flux de puissance en écrivant l'égalité des variables intensives et la continuité des variables extensives. Ce type de représentation évite naturellement les raideurs numériques. De plus, l'expression des équations de bilan sur ces variables, permet de mettre en évidence la structure géométrique du modèle, associée aux échanges d'énergie au sein du système. Cette structure pourra être avantageusement utilisée pour l'analyse et la commande. Cette formulation modulaire permet de changer facilement les lois constitutives sans reprendre pour autant la totalité de la modélisation. Enfin ce type de formalisme est tout à fait adapté pour la modélisation de contact et d'interactions entre systèmes (Duindam *et al.*, 2003). Le modèle obtenu est particulièrement intéressant lorsqu'on souhaite traiter la manipulation à l'échelle micrométrique voire nanométrique où les phénomènes d'adhésion sont importants.

*Exemple (suite) :* Comme mentionné précédemment, la micropince FTG100 peut être modélisée de plusieurs manières différentes. La complexité de sa dynamique est, d'une part, due au système d'actionnement utilisé, et, d'autre part, à l'aspect vibratoire mal amorti du doigt principal. En effet, l'actionneur électrostatique est composé de peignes inter-digités permettant d'appliquer à la partie mobile du peigne une force proportionnelle au carré de la tension d'alimentation. Cette dernière est connectée au bâti par le biais d'un système de suspensions de rappel (non linéaire) composé de 4 poutres bi-encastées. L'ensemble permet d'appliquer la force résultante au niveau du tiers du doigt mobile de la pince (cf Figure 11) assimilé à une poutre encastée-libre.

Une première approche consiste à estimer une transmittance linéaire au voisinage d'une plage de fonctionnement donnée, par des méthodes d'estimation paramétrique de type ARX, ARMAX ou Box Jenkin. On verra par la suite que la nature du modèle

obtenu dépend fortement de la plage de fonctionnement considérée. Une seconde approche consiste en une modélisation physique à base d'équations de poutres (Euler-Bernoulli ou Timoshenko). La troisième utilise le même type d'équations, mais avec un choix approprié des variables d'état permettant de mettre en évidence les symétries et la structure des échanges énergétiques au sein du système.

*Modélisation linéaire:* elle consiste à trouver la transmittance la plus simple (ordre le moins élevé) permettant de représenter correctement le comportement entrée-sortie du système. L'avantage est sa simplicité d'utilisation. En revanche, le modèle estimé dépend fortement du point de fonctionnement considéré. On obtient, pour l'ensemble de la plage de fonctionnement, une banque de modèles linéarisés. Ces différents modèles devront être considérés lors de la synthèse de la loi de commande. En ce qui concerne la pince FT-G100, alors que pour un échelon de 10 V un modèle du second ordre permet de recouvrer correctement la dynamique du système, un modèle du 7<sup>ème</sup> ordre est nécessaire pour un échelon de 120 V (Cf. Figure 12).



**Figure 11** Schéma de principe de la micropince.

On peut donc remarquer que selon l'amplitude de l'échelon la dynamique du système (temps de réponse, amortissement et gain statique) est très différente.

*Modélisation physique :* contrairement à l'approche précédente, on essaie de conserver le sens physique des variables manipulées et des paramètres du modèle (paramètres physiques des matériaux). Par exemple, le doigt de la pince peut être



représenté à l'aide d'une équation d'Euler-Bernoulli sous certaines hypothèse (faible débattement, pas de cisaillement):

$$\rho \frac{\partial^2 w(z,t)}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 w(z,t)}{\partial z^4} = \delta(z-a) Fw(t) \quad (1)$$

où  $\rho$  est la densité linéique de la poutre,  $E$  est le module d'Young et  $I$  le moment d'inertie. A cette équation, on doit ajouter des conditions frontières du type:

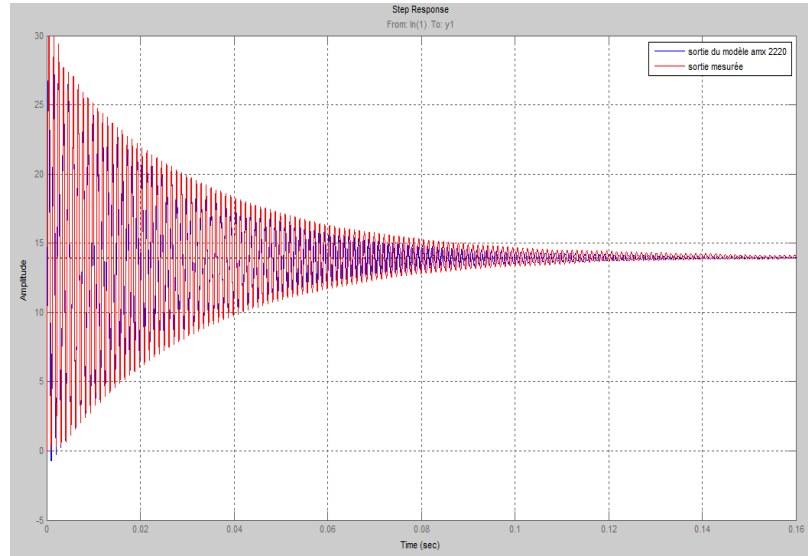
$$w(z,0) = \frac{\partial w(0,t)}{\partial z} = 0, \frac{\partial^2 w(L,t)}{\partial z^2} = \frac{\partial^3 w(L,t)}{\partial z^3} = 0 \quad (2)$$

L'équation résultante fait bien intervenir les paramètres physiques de la pince (masse linéique, module de Young etc.) ainsi que les variables de temps et d'espace. Mathématiquement ce système est de dimension infinie et il est nécessaire de l'approximer par des méthodes de type différences finies ou éléments finis pour pouvoir les traiter (simulation, commande) à base d'ODE. Les paramètres peuvent être estimés en utilisant des méthodes du modèle et des algorithmes de type Levenberg Marquardt. L'avantage est la conservation de la complexité du système, de son sens physique, et de son aspect distribué. L'inconvénient est du même ordre, la complexité pouvant être un frein à l'analyse et au traitement de ce type de système (difficultés théoriques et numériques).

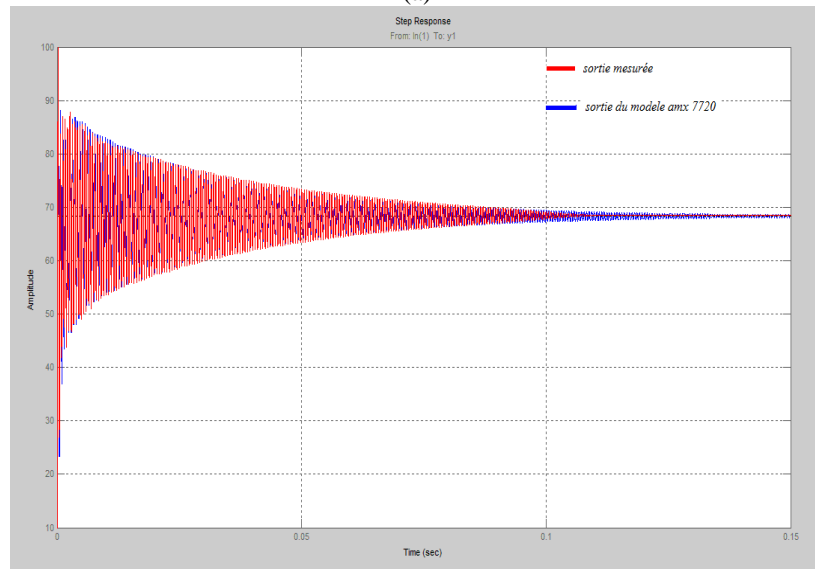
*Modélisation structurée* : l'idée est d'utiliser les variables d'énergie et de co-énergie pour la modélisation (la courbure, le moment cinétique et le moment de courbure, la vitesse pour la poutre). Ce choix permet de faire apparaître les transferts d'énergie au sein du système et met en évidence leur lien avec la dynamique. Cette modélisation repose sur le formalisme Hamiltonien à ports (van der Schaft *et al.*, 2002) et permet des développements mathématiques intéressants fondés sur la géométrie (mise en évidence de structure de Dirac (Le Gorrec *et al.*, 2005)). Le modèle reflète parfaitement les phénomènes physiques mis en jeu et utilise de manière centrale la fonction d'énergie totale du système. Le modèle obtenu est donc tout à fait prédisposé à l'étude de stabilité (approches de type Lyapunov) ou de passivité. Plusieurs techniques de commande relatives à ce formalisme ont été développées en ce sens (Ortega *et al.*, 2002).

Revenons à l'exemple de la poutre d'Euler Bernoulli. L'expression de l'énergie totale du système est donnée par la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle élastique :

$$H = \frac{1}{2} \int_L \left( \rho \left( \frac{\partial w(z,t)}{\partial t} \right)^2 + EI \left( \frac{\partial^2 w(z,t)}{\partial z^2} \right)^2 \right) dz \quad (3)$$



(a)



(b)

**Figure 12.** Réponse expérimentale (rouge) et simulée (bleue). (a) ordre 2, réponse à un échelon de 50 V, (b) ordre 7, réponse à un échelon de 120 V.

ou  $p$ ,  $E$ ,  $I$  sont les paramètres physiques de la poutre précédemment définis. En choisissant les variables d'énergie (dérivée spatiale de la position et moment cinétique) il est possible de réécrire l'équation du second ordre (1) sous forme d'une équation matricielle du premier ordre :

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}}_f = \begin{pmatrix} 0 & \frac{\partial^2}{\partial z^2} \\ -\frac{\partial^2}{\partial z^2} & 0 \end{pmatrix} \underbrace{\begin{pmatrix} \delta_{x_1} H \\ \delta_{x_2} H \end{pmatrix}}_e \text{ et } \begin{pmatrix} e_\partial \\ f_\delta \end{pmatrix} = g(e|_{0,1}, \frac{\partial e}{\partial z}|_{0,1}) \quad (4)$$

où  $f$  est le vecteur des flux,  $e$  le vecteur des efforts (force motrice),  $J$  un opérateur anti-symétrique et  $e_b$  et  $f_b$  les variables d'effort et de flux à la frontière. Cette formulation permet de mettre en évidence le lien entre la force motrice (dérivée de l'énergie par rapport aux variables d'état) et la dynamique. D'un point de vue mathématique cette relation s'exprime sous forme d'une structure géométrique, appelée structure de Dirac, caractéristique des systèmes conservatifs de puissance par l'antisymétrie de l'opérateur  $J$  dans le cas des systèmes fermés. L'extension de ces structures de Dirac aux systèmes ouverts permet d'inclure les variables frontières ( $e_b$  et  $f_b$ ) sous forme de flux de puissance à la frontière. Dans le cas linéaire l'existence de solution (Le Gorrec *et al.*, 2005), la commandabilité, la stabilité (Villegas *et al.*, 2005) etc. peuvent être étudiés en fonction du choix des conditions frontières (telle que (2) par exemple) en utilisant la théorie des semigroupes (Curtain *et al.*, 2005). Enfin le lien avec les systèmes abstraits, et donc avec les résultats théoriques qui leur sont associés, a été mis en évidence dans (Villegas *et al.*, 2005).

En résumé, nous avons montré dans cette section les différentes particularités de la modélisation des MEMS : non linéarités, aspects distribué et multiphysique. Nous avons passé en revue les différentes alternatives permettant de prendre en compte ces difficultés. Dans la section suivante, nous passons en revue sans prétendre à l'exhaustivité les techniques de synthèse de lois de commande applicables à ce type de systèmes.

## 4.2. Commande

Dans cette section, nous proposons un tour d'horizon (non exhaustif) des méthodes habituellement mises en œuvre dans le cadre de la commande des MEMS.

### 4.2.1. Approches non linéaires : modes glissants, backstepping, Lyapunov

Une catégorie importante de MEMS est décrite par le biais de modèles non linéaires issus de l'écriture des relations fondamentales de la mécanique en faisant des hypothèses d'homogénéisation (modèles dits lumpés) évitant ainsi d'avoir à traiter des systèmes à paramètres distribués. Le modèle résultant est fortement non linéaire. Il peut être utilisé pour mettre en œuvre des stratégies de commande non linéaires « directes » comme par exemple les approches à base de fonction de Lyapunov (Lyshevsky 1998), par modes glissants (Bature *et al.*, 2005) ou en utilisant des stratégies adaptatives afin de tenir compte des limitations des actionneurs

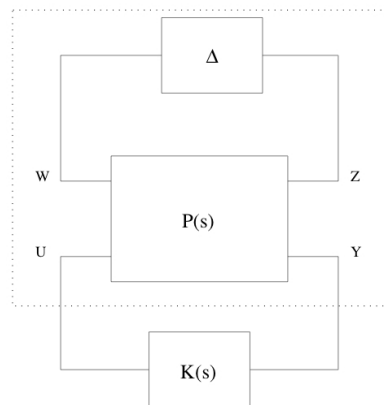
(Jagannathan *et al.*, 2004, Batur *et al.*, 2005). Mais ce modèle peut aussi être utilisé pour générer des trajectoires optimales dont le suivi sera assuré par une stratégie locale de type commande linéaire robuste (Zhu *et al.*, 2005a, Zhu *et al.*, 2005b).

#### 4.2.2. Approches linéaires robustes

Il est fréquent d'entendre parler de commande robuste lorsqu'on s'intéresse à la commande des microsystemes. Il est cependant relativement rare de trouver des travaux précis sur le sujet. En effet, le mot robustesse est souvent employé de manière abusive, pour spécifier que la loi de commande fonctionne correctement lorsqu'elle est appliquée in situ (sans pour autant avoir considéré cette spécification lors de la synthèse).

La commande robuste est une préoccupation née dans les années 80, en particulier dans le cadre d'applications aéronautiques de plus en plus exigeantes, et pour lesquelles les phénomènes mis en jeu aboutissent à des modèles incertains ou sujets à des perturbations exogènes (extérieures au système). Citons par exemple le cas de la synthèse de pilotes automatiques d'avions en phase d'atterrissage. Le modèle pris en compte dépend fortement de paramètres tels que la position du centre de gravité, la masse de l'appareil ou sa vitesse par rapport au vent. De plus, le système est soumis à des perturbations extérieures telles que les rafales de vent. La loi de commande a à faire face à ces deux types d'incertitudes. L'objectif est de les intégrer *a priori* dans la synthèse.

Il existe de nombreuses approches permettant de traiter les spécifications associées aux problèmes de robustesse. Afin de représenter de manière uniforme ces spécifications, il a été développé une représentation appelée « forme standard » ou représentation « LFT ». Dans ce formalisme, on met en évidence les signaux de commande (entrée et sortie du système) ainsi que les entrées et sorties exogènes, relatives aux performances désirées, Figure 13.

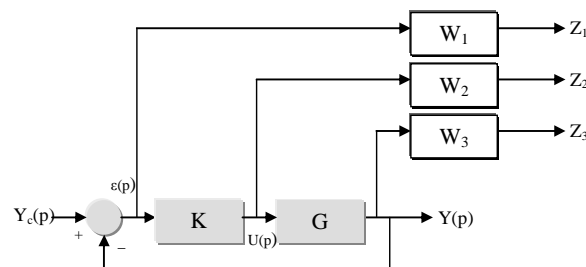


**Figure 13.** Représentation sous forme standard.

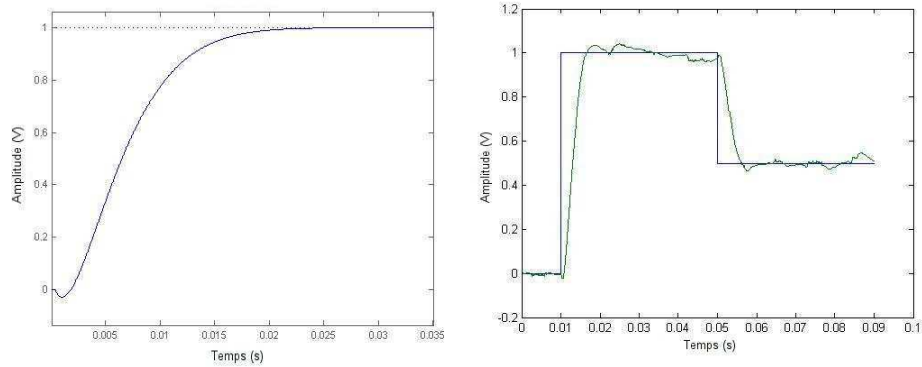
En ce qui concerne la synthèse, la technique la plus fréquemment adoptée en commande robuste est la synthèse  $H_\infty$ . Elle consiste à synthétiser un correcteur stabilisant permettant de minimiser la norme  $H_\infty$  du transfert liant  $w$  à  $z$ . Dans le domaine des microsystèmes, cette stratégie a, par exemple, été appliquée à la commande d'actionneurs piezo-électriques (Rakotondrabe *et al.*, 2009).

*Exemple (suite)*: revenons à l'exemple de la micropince à actionnement électrostatique (les résultats présentés dans cette partie ont été mis en œuvre sur une pince de type Nanotweezer (Yamahata *et al.*, 2006)). L'identification du système (méthode de type ARMAX) permet de représenter le système par une fonction de transfert rationnelle du septième ordre. On souhaite ensuite imposer des contraintes fréquentielles relatives aux performances (temps de réponse de 15ms sans dépassement), à la précision et au rejet des bruits de mesure. Ces spécifications peuvent être prises en compte dans la synthèse par le biais de la forme LFT du schéma de la Figure 14 où  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  sont des pondérations fréquentielles choisies en fonction des précédentes spécifications. L'algorithme de synthèse permet d'obtenir un correcteur d'ordre égal à la somme des ordres du système et des pondérations. Les résultats obtenus sont donnés sur la Figure 15.

Sur cette figure, on peut noter que les spécifications relatives au temps de réponse, à la précision et au rejet des perturbations sont correctement assurées. Cependant le correcteur synthétisé ne permet pas d'assurer des performances équivalentes pour d'autres tensions d'alimentation. En effet les inconvénients majeurs de ces approches sont : leur aspect local, leur conservatisme et l'ordre élevé des correcteurs obtenus. En effet, les non linéarités des microsystèmes sont souvent importantes et peuvent mettre ce type de loi de commande en défaut. De plus les fréquences mises en jeu étant élevées, l'ordre des correcteurs peut être un frein à leur implantation en temps réel. Une alternative intéressante pour éviter ces inconvénients, est l'utilisation de gains séquencés (Döll *et al.*, 2001). D'autres approches robustes ont été appliquées dans le cadre de la commande des microsystèmes, soit directement soit en complément de commandes par génération de trajectoires. Citons par exemple les approches polynômiales de type Kharitonov (Park *et al.*, 2003) ou la  $\mu$ -synthèse (Arancibia *et al.*, 2005).



**Figure 14.** Mise sous forme standard du problème de commande.



**Figure 15.** Performances obtenues par commande  $H_\infty$  sur une pince à actionnement électrostatique. Réponse indicielle (gauche) – Réponses indicielles avec perturbation (droite).

#### 4.2.3. Approches énergétiques

La formulation Halmiltonienne à ports étant basée sur l'énergie et les flux de puissance associés aux couples de variables d'entrées et de sorties, elle se prête particulièrement aux approches basées sur les notions de passivité (Power Shaping). L'idée est d'utiliser une fonction de stockage dont le minimum sera imposé (à la valeur de l'état d'équilibre désiré). Cette fonction peut être choisie comme étant la différence entre l'énergie du système stockée et l'énergie dissipée. Cette approche ne fonctionne plus en cas de dissipation persistante du système en boucle ouverte. Dans ce cas il est nécessaire de mettre en œuvre des approches de type IDA-PBC (Ortega *et al.*, 2002). Le principe consiste à utiliser la fonction Hamiltonienne du système, augmentée par celle du correcteur, comme fonction de Lyapunov naturelle. Les variations possibles, à partir de ce principe de synthèse, résident dans le choix des degrés de liberté et dans la capacité à fixer ces degrés de liberté à partir de la formulation du problème de commande. Cette approche est élégante pour traiter les problèmes de commande non linéaire. De nombreux travaux sont actuellement menés afin de généraliser ces approches aux différentes classes de systèmes traités, y compris aux systèmes hybrides. Lorsque le système est décrit par des EDP linéaires, il est possible d'utiliser le même type d'approche moyennant une analyse mathématique rigoureuse et l'utilisation de la théorie des semigroupes (Le Gorrec *et al.*, 2005). En effet dans ce cas la stabilité doit être définie avec précision. Des résultats relatifs aux problèmes de contrôle à la frontière peuvent être trouvés dans (Villegas *et al.*, 2005). Lorsqu'un retour d'état est recherché, il est possible d'utiliser des techniques d'immersion-réduction proposées dans (Machelli *et al.*, 2004).

## 5. Conclusion

Comme nous venons de le voir, l'évolution des technologies permet de travailler à des échelles jusqu'alors non envisagées. L'objectif, à moyen terme, est de permettre la manipulation d'objets à l'échelle nanométrique. Ce défi technologique s'accompagne d'une réelle évolution des actionneurs et des capteurs mis en oeuvre, par le biais de matériaux innovants et de principes physiques spécifiques aux microsystèmes. Modéliser, analyser et commander ces microsystèmes ne consiste pas en une simple mise à l'échelle des outils traditionnellement utilisés dans le cadre de l'étude des macrosystèmes. Il est nécessaire de développer des modèles et des outils spécifiques, permettant de traiter des phénomènes physiques traditionnellement négligés ou peu étudiés. De plus, les microsystèmes font appel à des matériaux et à des principes d'actionnement complexes, de par leur nature (matériaux souples, hétérogènes etc.) et leur utilisation (couplages électromécaniques, électro-magnétique). Les théories développées doivent donc tenir compte de l'aspect non linéaire, multiphysique, et distribué de ces nouveaux systèmes. Enfin, l'accès à la mesure est particulièrement critique (capteurs rares, bruits importants) rendant la mise en œuvre des lois de commande encore plus difficile. Cette complexité est un réel enjeu tant sur le plan technologique que théorique. Il est alors tout à fait justifié de parler de spécificité du micromonde et il nous semble qu'il s'agit d'un réel défi pour l'Automatique de demain.

## 6. Bibliographie

- Arai F., Nakajima M., Dong L., Fukuda T., « The pico-Newton Order Force Measurement with a Calibrated Carbon Nanotube Probe », *Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 691-695, Kobe, Japan.
- Arancibia N.O.P., Chen N., Gibson S., and Tsao T.C. . « Adaptive Control of a MEMS Steering Mirror for Suppression of Laser Beam Jitter », *Proceedings of ACC*, Portland, OR, USA, June 8-10, 2005.
- Bature C., Sreeramreddy T., and Khasawneh Q. « Sliding mode control of a simulated MEMS gyroscope », *Proceedings of ACC*, Portland, OR, USA, June 8-10, 2005.
- Benzaoui H., Modélisation thermomécanique et commande d'actionneurs en alliages à mémoire de forme pour la microrobotique, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 1998.
- Bryzek J., Abbott E., « Control Issues for MEMS », *42nd IEEE Conference on Decision and Control*, Maui, Hawaii USA, December 2003.
- Chen N.O.P., Gibson N., Tsu-Chin Tsao S., « Adaptive control of a MEMS steering mirror for suppression of laser beam jitter », *Proceedings of the American Control Conference*, Arancibia, vol. 5, 8-10 June 2005 p. 3586-3591.
- Chilali M., Gahinet P., Apkarian P., « Robust Pole Placement in LMI Regions », *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 44, n° 12, 1999, p. 2257-2270.

- Conte G., Moog C.H., Perdon A.M., *Nonlinear Control Systems : An Algebraic Setting*, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer Berlin / Heidelberg, ISBN 978-1-85233-151-1, Volume 242, 1999.
- Curtain R.F. and Zwart H.J., « An introduction to infinite-dimensional linear systems theory » Springer Texts In Applied Mathematics, Vol. 21 1995, ISBN:0-387-94475-3.
- Dechev N., Mills J., Cleghorn W. L., « Mechanical fastened designs for use in the microassembly of 3D microstructures », *IMECE, ASME International Mechanical Engineering Congress and RID expor* 2004.
- Döll C., Le Gorrec Y., Ferreres G., Magni J.F., « A robust self-scheduled missile autopilot : Design by multi-model eigenstructure assignment and comparison. », *Pergamon, Control Engineering Practice*, Vol : 9, 2001, p. 1067-1078.
- Duindam V., Stramigioli S., « Modeling the Kinematics and Dynamics of Compliant Contact », *ICRA 2003*, p 4029-4034.
- Fukuta Y., Chapuis Y.-A., Mita Y., Fujita H., « Design, Fabrication and Control of MEMS-Based Actuator Arrays for Air-Flow Distributed Micromanipulation », *Journal of Micro-Electro-Mechanical Systems*, 2006.
- Fung, C. K. M., Elhajj I., Li W. J., Xi N., « A 2-D PVDF Force Sensing System for Micro-Manipulation and Micro-assembly », *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1489-1494, Washington, D.C. USA.
- Gauthier J-Y, Hubert A., Abadie J., Chaillet N., Lexcelent C., « Nonlinear Hamiltonian modelling of magnetic shape memory alloy based actuators », *Sensors and Actuators*, A141, 2008, p 536-547.
- Grossard M., Contribution à la conception optimale et la commande de systèmes mécatroniques flexibles à actionnement piézoélectrique intégré. Application en microrobotique, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2008.
- Haddab Y., Chen Q., Lutz P., « Improvement of Strain Gauges Micro-forces Measurement Using Kalman Optimal Filtering », *International Journal of IFAC Mechatronics*, Vol. 19, Issue 4, 8, pp. 457-462, 2009, doi:10.1016/j.mechatronics.2008.11.012.
- Hameed M., « Adaptive Force Balancing Control of MEMS – Gyroscope with Actuator Limits », *Proceedings of ACC*, Boston, Massachusetts 2004.
- Isidori A., *Nonlinear Control Systems*, third edition, Springer Verlag, London, 1995.
- Jagannathan S. and Hameed M. « Adaptive force-balancing control of MEMS gyroscope with actuator limits », *Proceedings of ACC*, Boston, MA, USA, 2004.
- Karnopp D. C., Rosenberg R. C., Margolis, D. L., *System dynamics: a unified approach*, Wiley, ISBN 0-471-62171-4, 1990.
- Khalil H. K., *Nonlinear Systems*, third edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2002.
- Le Gorrec Y., Zwart H. and Maschke B., « Dirac structures and Boundary Control Systems associated with Skew-Symmetric Differential Operators », *SIAM Journal on Control and Optimization*, Vol 44, Issue 5, 2005, p. 1864-1892.



- Lu Z., Chen P. C. Y., Lin W., « Force Sensing and Control in Micromanipulation », *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Part C, vol. 36. Issue 6. pp. 713-724, 2006.
- Lyshevski S.E., « Micro-Electromechanical Systems : Motion Control of Micro-Actuators», *Proceedings of CDC*, Tampa, Florida USA, 1998.
- Macchelli A., Melchiorri C., « Modeling and Control of the Timoshenko Beam. The Distributed Port Hamiltonian Approach », *SIAM Journal On Control and Optimization (SICON)*, 2004, vol. 43, n.2, p. 743-767.
- Nishida G., Takagi K., Maschke B., Luo Z., « Multi-Scale Distributed Port-Hamiltonian Representation of Ionic Polymer-Metal Composite », *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*, Volume 17 , Part 1, 2008.
- Ortega R., van der Schaft A., Maschke B. and Escobar G., « Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled hamiltonian systems », *Automatica*, Vol. 38, No.4, April 2002.
- Park T.S, Shin E.C, Oh W.H, Yoo J.Y., « Robust Speed Control for Torsional Vibration Suppression of Rolling Mill Drive System », *The 29th Annual Conference of the IEEE IECON*, 2-6 vol. 1, Nov. 2003, p 66-71.
- Rakotondrabe M., Haddab Y., and Lutz P., « Quadrilateral Modelling and Robust Control of a Nonlinear Piezoelectric Cantilever », *IEEE Control System Technology*, 2009.
- Régnier S., Chaillet N., *La microrobotique*, Paris, Hermès, Lavoisier 2008, ISBN : 978-2-7462-1885-7.
- Scherer C.W., Gahinet and P., Chilali M., « Multiobjective output feedback control Via LMI optimization », *IEEE Trans. Autom. Control*, 42(7), 1997, p. 896-911.
- van der Schaft A.J., Maschke B.M., « Hamiltonian formulation of distributed parameter systems with boundary energy flow », *J. of Geometry and Physics*, Vol. 42, 166– 194, 2002, p. 166-174.
- Vidyasagar M., *Nonlinear Systems Analysis*, second edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- Villadsen, J., Michelsen, M.L., *Solution of differential equation models by polynomial approximation*, Prentice Hall (1978).
- Villegas J.A., Zwart H., Le Gorrec Y., Maschke B., Exponential Stability of a Class of Boundary Control Systems, *IEEE Transaction on Automatic Control*- To appear 2009.
- Villegas J.A., Le Gorrec Y., Zwart H., « Boundary control systems and the system node », *In proc. of IFAC World Congress*, Pragma, 25 July 2005.
- Yamahata C., Takekawa T., Ayano K., Hosogi M., Kumemura M., Legrand B., Collard D., Hashiguchi G., Fujita H., « Silicon Nanotweezers with Adjustable and Controllable Gap for the Manipulation and Characterisation of DNA Molecules », *Proceedings of 2006 International Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology*, Okinawa, Japan, pp. 123-126, 9-12 May 2006.

- Zhang W., Meng G., Li H., « Adaptive vibration control of micro-cantilever beam in MEMS », *30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Busan, South Korea, 2-6 November 2004.
- Zhu G., Lévine J. and Praly L., « Improving the Performance of an Electrostatically Actuated MEMS by Nonlinear Control: Some Advances and Comparisons », *Proceedings of the 44th Conference on Decision and Control and the European Control Conference*, Seville, Spain, December 12-15, 2005.
- Zhu G., Lévine J. and Praly L., « On the Differential Flatness and Control of Electrostatically Actuated MEMS », *Proceedings of ACC*, Portland, OR, USA, June 8-10, 2005.